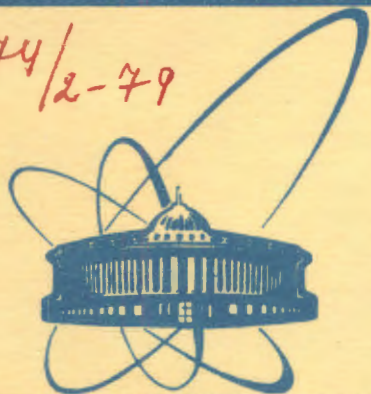


5174/2-79



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

В-751

14/12-79  
P9 - 12577

С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ  
ВРЕМЕННОЙ РАСТЯЖКИ ПУЧКА СИНХРОЦИКЛОТРОНА  
ПРИ ПОМОЩИ С-ЭЛЕКТРОДА

1979

P9 - 12577

С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ  
ВРЕМЕННОЙ РАСТЯЖКИ ПУЧКА СИНХРОЦИКЛОТРОНА  
ПРИ ПОМОЩИ С-ЭЛЕКТРОДА

Объединенный институт  
ядерных исследований  
Библиотека

Ворожцов С.Б., Дмитриевский В.П., Заплатин Н.Л. P9 - 12577

Расчет оптимальных режимов временной растяжки пучка синхроциклотрона при помощи С-электрода

В работе приведены результаты численного моделирования процесса растяжки пучка при помощи С-электрода для синхроциклотрона. Рассмотрены два режима растяжки: перезахват из сепаратрисы дуанта и из предварительно остановленного пучка. Рассмотрен процесс дробления пучка при работе С-электрода на частоте, кратной частоте обращения частиц. Указаны оптимальные режимы, осуществляемые при минимальном напряжении на С-электроде и максимальной эффективности растяжки. Результаты работы использованы для системы растяжки пучка сильноточного фазотрона ОИЯИ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Vorozhtsov S.B., Dmitrievsky V.P., Zaplatin N.L. P9 - 12577

Numerical Modeling of the Beam Stretch Process by means of C-Electrode for the Synchrocyclotron

The results of numerical modeling of the beam stretch process by means of C-electrode for the synchrocyclotron are presented. Two methods of stretching are considered: re-capture from the separatrix of the dee and from the preliminarily stopped beam. The process of the beam chopping when C-electrode has a frequency multiple to the rotational frequency of particle is discussed. Optimum regimes, which can be realized with minimum voltage on the C-electrode and with maximum of the stretching efficiency are shown. These results were used for the system of the beam stretching in the Dubna high-current synchrocyclotron.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ с 1973 года работает временная растяжка выведенного протонного пучка синхроциклотрона при помощи вспомогательного С-электрода<sup>1/</sup>. Переход пучка от ускорения дуантом к ускорению С-электродом происходит с эффективностью 45% при максимальной амплитуде напряжения на С-электрод  $V_{mc}=11$  кВ.

Целью данного исследования является нахождение режимов работы дуанта и С-электрода, позволяющих получить максимальную эффективность растяжки пучка синхроциклотрона при минимальном значении  $V_{mc}$  и максимальном коэффициенте заполнения микроимпульса пучка.

Для анализа синхротронного движения частиц при наличии двух ускоряющих систем: дуанта и С-электрода - была написана программа на ЭВМ, при помощи которой моделировался процесс движения частиц в зоне системы растяжки. Схема расположения ускоряющих систем приведена на рис. 1. Расчеты проводились для параметров синхроциклотрона ЛЯП, приведенных в таблице.

Определение эффективности захвата частиц С-электродом производилось путем проводки изображающих точек фазовой плоскости пучка через систему дуант - С-электрод. На рис. 2 представлено положение этих точек в пределах сепаратрисы дуантной программы в начале движения. Каждая ускоряемая частица характеризовалась в исходном положении начальным азимутом  $\alpha_0$ , моментом времени  $t_0$  и кинетической энергией  $W_0$ . Частица считалась перезахваченной, если она совершала не менее двух фазовых колебаний под контролем С-электрода и при выключенном напряжении на дуанте. Эффективность системы растяжки определялась как отношение числа перехваченных частиц к числу стартовавших.

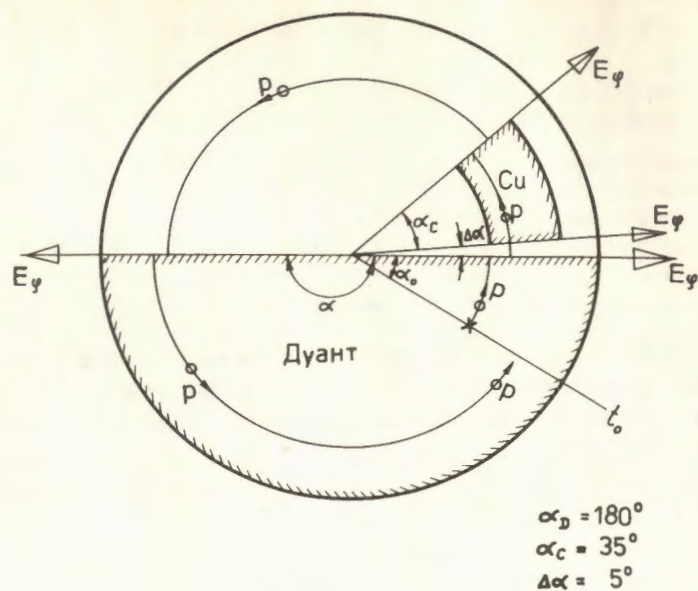


Рис.1. Схема расположения дуанта и С-электрода.

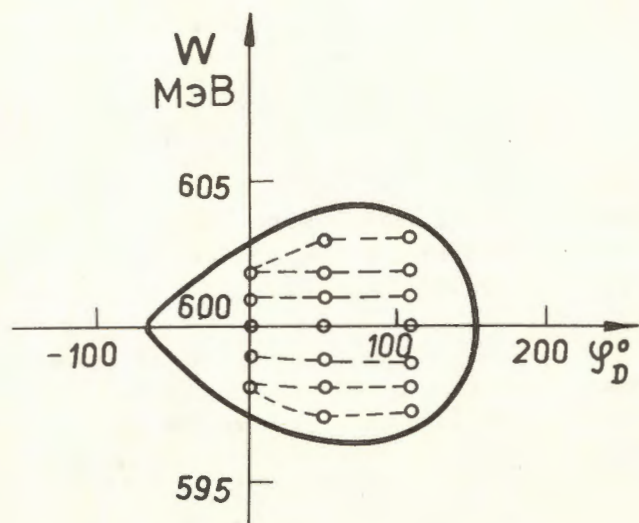


Рис.2. Фазовая область пучка до начала растяжки.

Таблица

Параметр	Определение	Значение
$V_{mD}$	Напряжение на дуанте	20 кВ
$R_{CH}$	Радиус кромки С-электрода	2,6 м
$2h_C$	Вертикальная апертура С-электрода	14 см
$f_n$	Частота перезахвата пучка	14,42 МГц
$T_M$	Период модуляции частоты синхротрона	6 мс
$R_n$	Радиус перезахвата пучка	2,669 м
$W_n$	Энергия перезахвата	645 МэВ
$B_n$	Магнитное поле перезахвата	1,5941 Т
$K$	Параметр автофазировки	1,106
$2\Delta W_{m\Phi}$	Энергетический размер сепаратрисы дуанта	9 МэВ
$\cos\phi_{SD}$	Косинус равновесной фазы дуанта	0,295
$\phi_{SD}$	Равновесная фаза дуанта	$72,83^\circ$
$\dot{f}_D$	Производная частоты дуанта по времени	-1,71 МГц/мс
$\dot{f}_C$	Производная частоты С-электрода по времени	-31,8 кГц/мс
$A_{BD}$	Фазовая площадь сепаратрисы дуанта	288 МэВ·нс
$A_H$	Фазовая площадь пучка	190 МэВ·нс

Поскольку главной характеристикой оптимального режима растяжки считалась в данном исследовании максимальная эффективность, то из всех известных режимов растяжки анализировался лишь режим одноциклового синхротронного доускорения /ОСД/ в вариантах:

- а/ перезахват из сепаратрисы дуантной программы /ПСДП/;
- б/ перезахват из предварительно остановленного пучка /ППОП/.

Кроме того, рассматривался режим дробления пучка при помощи возбуждения на С-электроде  $q$ -той гармоники частоты обращения синхронной частицы. В этом случае формируется  $q$  сгустков на периоде обращения частиц.

### ПЕРЕЗАХВАТ ИЗ СЕПАРАТРИСЫ ДУАНТНОЙ ПРОГРАММЫ

Частотные программы дуанта и С-электрода для этого режима представлены на рис. 3. Переход пучка от ускорения дуантом к ускорению С-электродом имеет место при  $t = t_n$  и  $f_D = f_C = f_n$ , где  $f_n$  - минимальная частота, при которой еще отсутствует импульс пучка малой длительности на внутренней мишени ускорителя. Напряжение на дуанте  $V_{OD}$  снималось по линейному закону во времени вблизи  $t = t_n$

$$V_{OD}(t) = \begin{cases} V_{mD} \cdot \text{при } t < t_n - \Delta t; \\ V_{mD} \left(1 - \frac{t - t_n + \Delta t}{2\Delta t}\right), \text{ при } t_n - \Delta t < t < t_n + \Delta t; \\ 0, \text{ при } t > t_n + \Delta t. \end{cases} \quad /1/$$

где  $2\Delta t$  - время полного снятия напряжения на дуанте.

Амплитуда напряжения на С-электроде  $V_{OC}$  в данном режиме не зависит явно от времени. Зависимость же  $V_{OC}$  от радиального положения пучка имела вид:

$$V_{OC}(R) = \begin{cases} 0, \text{ при } R < R_{CH} - h_C; \\ \frac{R - R_{CH} + h_C}{2h_C} V_{mc}, \text{ при } R_{CH} - h_C < R < R_{CH} + h_C; \\ V_{mc}, \text{ при } R > R_{CH} + h_C. \end{cases} \quad /2/$$

Результаты расчета эффективности сравнивались при одинаковых параметрах с экспериментальными данными<sup>/1,5/</sup>. На рис. 4 представлена функция эффективности в зависимости от временной

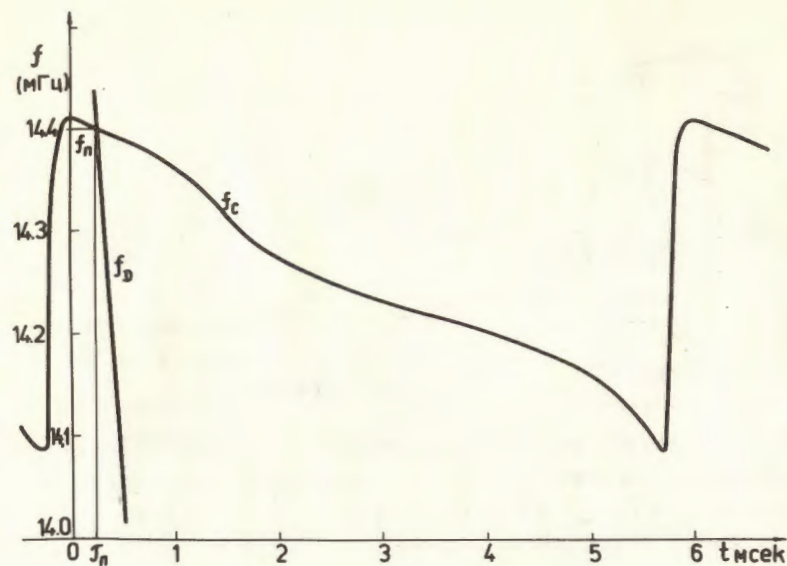
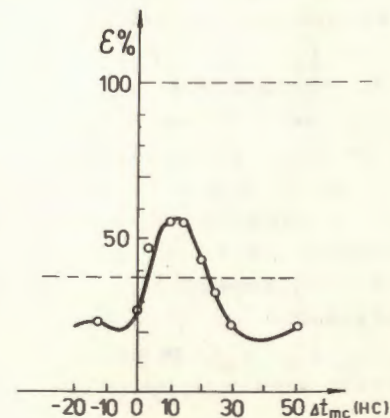


Рис. 3. Частотные программы дуанта и С-электрода.

задержки  $\Delta t_{mc}$ , определяющей разности фаз дуантной и С-электродной программ в момент  $t_n$ . Оптимальное значение  $\Delta t_{mc}$ , при котором эффективность максимальна, определяется такой синхронизацией фаз дуанта и С-электрода, когда общая площадь их сепаратрисы /рис. 5/ при взаимном перемещении по оси  $\phi$  максимальна.

Рис. 4. Сравнение расчетной и экспериментальной эффективности  $V_{mc} = 9,5$  кВ,  $2\Delta t = 70$  мкс; ооо - эксперимент; — — — расчет, - - - эксперимент без синхронизации фаз.



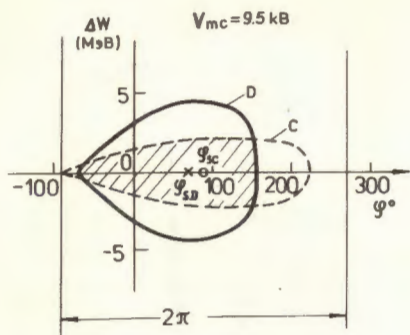


Рис.5. Сепаратрисы дуанта и С-электрода в момент перезахвата.

Как видно из рис. 5, для полного перезахвата пучка при минимальном напряжении на С-электроде необходимо так менять параметры режима перезахвата, чтобы удалось согласовать форму и размеры сепаратрис дуанта и С-электрода. Для этого необходимо иметь минимально возможный энергетический размер пучка после отключения напряжения на дуанте. Так как перезахват осуществляется в условиях  $\dot{f}_D = 0$ , то в нашем случае невозможно осуществить квазиadiaбатическое снятие  $V_{OD}$ , как это было предложено в [2]. Поэтому наилучший режим соответствует быстрому по сравнению с периодом фазовых колебаний снятию  $V_{OD}$ , когда энергия частиц почти не изменяется. На рис. 6 представлена расчетная зависимость энергетического размера пучка в момент  $V_{OD} = 0$  при различных скоростях снятия  $V_{OD}$ . Увеличение энергетического размера пучка при уменьшении скорости снятия  $V_{OD}$  связано с тем, что при  $\dot{f}_D \neq 0$  и  $V_{OD} \rightarrow 0$  значение  $\cos \phi_{SD} \rightarrow 1$ , и часть частиц оказывается вне диапазона фаз сепаратрисы. Чем больше время нахождения этих частиц вне сепаратрисы, тем больше энергетический разброс пучка. Аналогичное явление имеет место и для случая  $V_{mc} \neq 0$  при снятии  $V_{OD}$ , что приводит к снижению эффективности перезахвата пучка. Штрихпунктирная линия на рис. 6 соответствует адиабатическому снятию напряжения на дуанте при  $V_{mc} = 0$ , когда весь пучок вытягивается на фазовой плоскости в полосу с размерами  $(2\pi, f_D \cdot A_H)$ . Если же  $V_{mc} \neq 0$  при снятии  $V_{OD}$ , то имеет место эффект фазового смещения пучка при взаимодействии

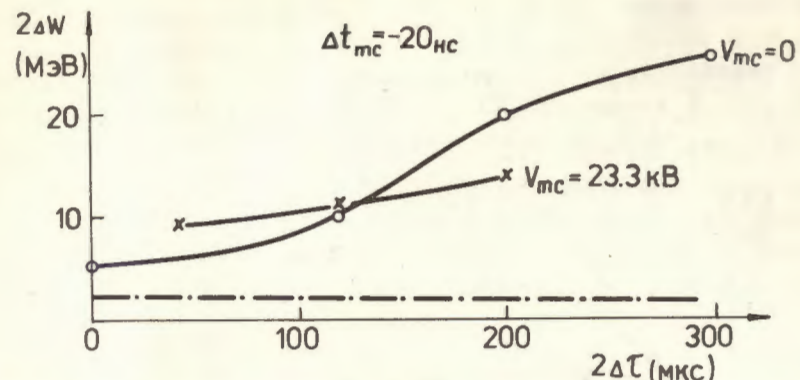


Рис.6. Зависимость энергетического размера пучка от скорости снятия напряжения дуанта.

сепаратрисы С-электрода с фазовой площадью частиц. Оценка этого эффекта при бесконечном числе оборотов по формуле [6]

$$\Delta W_{CM} = A_{bc} \cdot f_C \quad /3/$$

где  $A_{bc}$  - фазовая площадь сепаратрисы С-электрода, дает значение  $\Delta W_{CM} = 4,5$  МэВ. Из рис. 7 видно, что при  $V_{mc} \neq 0$  центр

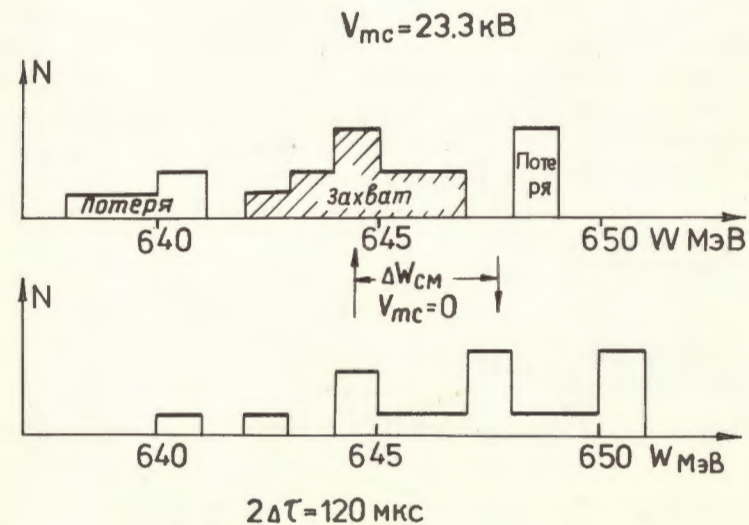


Рис.7. Эффект фазового смещения пучка.

остановленного пучка сместился в нашем случае на  $\Delta W_{CM} = 3 \text{ МэВ}$ . Зависимость максимального по  $\Delta t_{mc}$  значения  $\epsilon_{max}$  от напряжения на С-электроде при  $2\Delta t = 2 \text{ мкс}$  представлена на рис. 8, кривая /ПСДП,  $q=1/$ . Из рис. 8 видно, что наилучшее  $\epsilon_{max} = 84\%$  достигается при  $V_{mc} = 13 \text{ кВ}$ . Полный перезахват

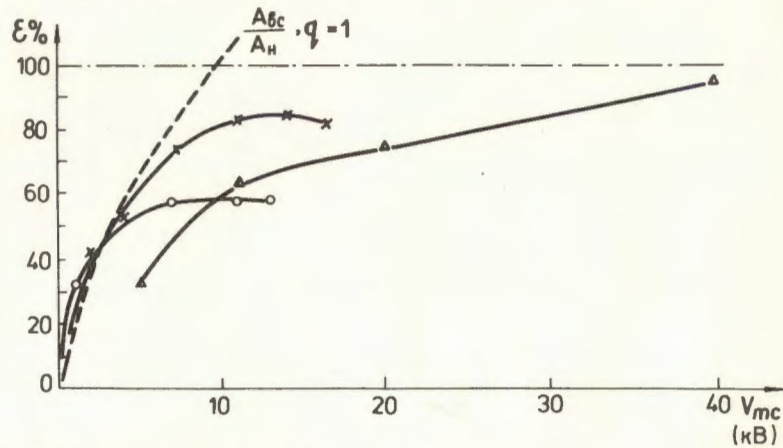


Рис.8. Зависимость эффективности перезахвата от напряжения на С-электроде  $\times \times \times$  - ПСДП,  $q=1$ ;  $ooo$  - ПСДП,  $q=5$ ;  $\Delta \Delta \Delta$  - ППОП,  $q=5$ .

недостижим в этом случае из-за эффекта фазового смещения. Сравнивая кривую  $\epsilon_{max}(V_{mc})$  с отношением фазовой площади сепаратрисы С-электрода  $A_{bc}$  к фазовой площади пучка к моменту перезахвата  $A_{II}$ , можно прийти к выводу, что оценку необходимых  $V_{mc}$  и  $\phi_{SC}$  для этого режима можно получить путем совместного решения уравнений

$$A_{II} = \frac{8}{\pi^{3/2}} \left[ \frac{V_{mc} E_n}{f_n^2 K} \cdot \frac{\sin \beta(q)}{q} \right]^{1/2} \alpha(\phi_{SC}) \quad /4/$$

$$\cos \phi_{SC} = \frac{E_n}{2 V_{mc} \cdot K \cdot f_n^2} \cdot \frac{f_c}{q \cdot \sin \beta(q)},$$

где

$$\beta(q) = \min \left\{ q \frac{\alpha_C}{2}, \frac{\pi}{2} \right\}. \quad /5/$$

$\alpha(\phi_{SC})$  - нормализованная площадь сепаратрисы С-электрода,  $E_n$  - полная энергия частиц в момент перезахвата.

Оценку коэффициента заполнения микроимпульса  $K_{зап}$  можно получить, если считать, что любая частица, получившая в некоторый момент энергию  $W_P - W_B$ , теряется для внутреннего пучка. Здесь  $W_B$  определяется либо радиальным положением внутренней мишени, либо радиусом начала радиальной неустойчивости пучка в системе регенеративного вывода. На основании этих соображений можно построить область частиц, попадающих на эффективную мишень при  $W > W_B$  /рис. 9/. При

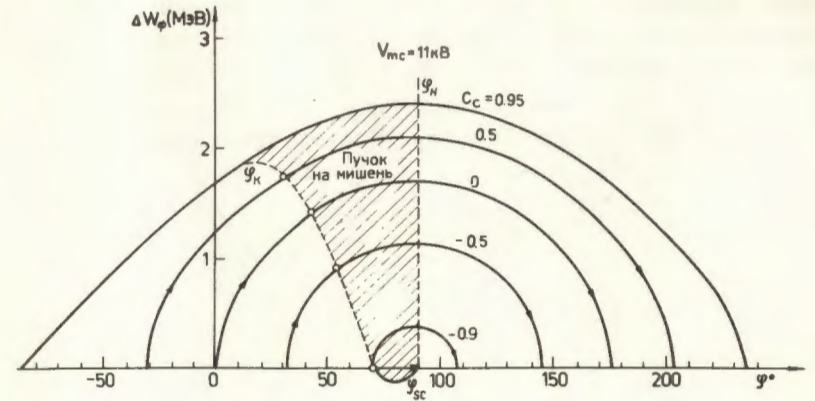


Рис.9. Область частиц, попадающих на мишень.

малых значениях  $\cos \phi_{SC}$  диапазон фаз указанной области для каждой фазовой траектории можно приближенно найти из соотношения

$$\Delta \phi = 2\pi^{1/4} (\cos \phi_{SC} \cdot \frac{T_{\phi}}{T_0})^{1/2} (\frac{\Delta W_m}{E} \cdot K \cdot q)^{1/4} (C + 1 - \frac{\pi}{2} \cos \phi_{SC})^{1/4} \quad /6/$$

где  $T_0$  - период обращения частиц,  $T_{\phi}$  - период фазовых колебаний на данной траектории,  $\Delta W_m$  - максимальный набор энергии за оборот,  $C$  - константа фазовой траектории. На основании /6/ получим

$$K_{зап} = \frac{1}{2\pi} \max(\Delta \phi), \quad /7/$$

где максимум берется по траекториям с имеющимися частицами. Для ПСДП-режима получим  $K_{\text{зап}} = 15\%$ .

### ДРОБЛЕНИЕ ПУЧКА

Для некоторых физических экспериментов полезно иметь  $q$ -сгустков вместо одного на периоде обращения частиц. Этот режим может быть получен при работе С-электрода на  $q$ -кратности частоты обращения. Параметры такой системы для ПСДП-режима могут быть найдены на основании решения /4/. Результаты расчета по /4/ представлены на рис. 10, из которого видно, что при  $q > 5$  из-за  $q \cdot \frac{a_C}{2} > \frac{\pi}{2}$  сильно возрастает требуемое  $V_{mc}$ , что, по-видимому, и является ограничением на кратность дробления пучка. Расчет эффективности захвата в режиме ПСДП показал, что  $\epsilon_{\text{max}} < 60\%$  при  $q = 5$  /рис. 8/,

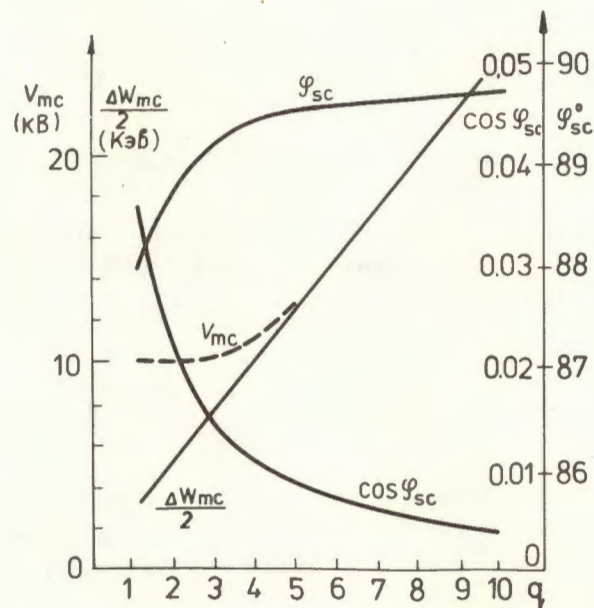


Рис.10. Параметры системы дробления пучка.

что объясняется меньшим согласованием сепаратрис дуанта и С-электрода в этом случае /рис. 11/. Из этого рисунка также видно, что можно ожидать неравномерного заполнения сепаратрис С-электрода при  $q > 1$ . Что касается  $K_{\text{зап}}$ , то, как видно из /6/, с учетом того, что  $T_{\phi} \sim 1/\sqrt{q}$ , суммарное значение  $K_{\text{зап}}$  для  $q$ -сепаратрис не зависит от значения  $q$ . Это означает, что каждый из сгустков будет в  $q$  раз меньшей длительности, чем это было в режиме без дробления пучка.

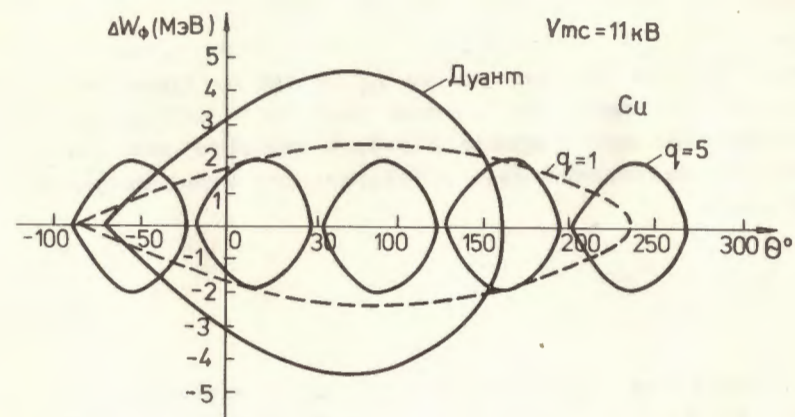


Рис.11. Сепаратрисы дуанта и С-электрода при дроблении пучка.

### ПЕРЕЗАХВАТ ИЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОСТАНОВЛЕННОГО ПУЧКА

В этом режиме  $V_{OD}(t)$  определяется по /1/, где  $2\Delta r$  мало по сравнению с  $T_{\phi D}$ . Частотная программа  $f_D(t)$  также совпадает с режимом ПСДП. Изменения касаются напряжения на С-электроде  $V_{OC}(t)$  и частоты  $f_C(t)$  С-электрода:

$$V_{OC}(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < r_s \\ \frac{t-r_s}{\Delta t_C} V_{mc}, & \text{при } r_s < t < r_s + \Delta t_C \\ V_{mc} & \text{при } t > r_s + \Delta t_C \end{cases} \quad /8/$$



где  $r_s = r_n + \Delta r + \Delta t_C$ ,

$\Delta t_C > T_{\text{фс}}$ .

$$\tilde{f}_C(t) = \begin{cases} f_C(t - \Delta r - \Delta t_C) & t < r_s \\ f_C(r_s) & r_s < t < r_s + \Delta t_C \\ f_C(t - \Delta r - 2\Delta t_C) & t > r_s + \Delta t_C \end{cases}$$

где  $f_C(t)$  - частота на С-электроде в режиме ПСДП /рис. 3/. При быстром снятии  $V_{\text{OD}}$  и при отсутствии напряжения на С-электроде частицы заполняют весь диапазон фаз, равный  $2\pi$ , при сохранении энергетического размера пучка. Поэтому фазовая площадь остановленного пучка возрастает до значения

$$\tilde{A}_n = \frac{2\Delta W_{\text{мф}}}{f_n} \quad /9/$$

В этом случае для полного перезахвата необходимо, как это следует из рис. 8, увеличение напряжения на С-электроде до  $V_{\text{мс}} = 43 \text{ кВ}$  при  $q = 5$ . При этом имеет место равномерное заполнение всех  $q$ -сепаратрис, и не требуется сложного оборудования для синхронизации фаз частотных программ ускоряющих систем. Данный режим может быть рекомендован для пучков с малым энергетическим размером, когда необходимое значение  $V_{\text{мс}}$  для полного перезахвата пучка не столь велико, как для синхроциклотрона ОИЯИ.

В заключение следует отметить, что результаты проведенного исследования и разработанная методика расчета будут использованы при проектировании системы растяжки пучка сильноточного фазотрона с пространственной вариацией поля /уст. "Ф"/.

Авторы благодарят Л.М.Онищенко, П.Т.Шишлянникова за обсуждение отдельных вопросов, Б.Н.Марченко, Т.Н.Томилину, В.А.Яковлева за предоставление экспериментальных данных по ускоряющим системам синхроциклотрона ОИЯИ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Глазов А.А. и др. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т. 1, с. 242.
2. Lindback S. CERN Int.Rep. MSC-71-1, 1971.
3. Абросимов Н.К. и др. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1975, т. 2, с. 94.
4. Онищенко Л.М. ОИЯИ, Р9-7836, Дубна, 1974.
5. Марченко Б.Н., Томилина Т.Н., Яковлев В.А. ОИЯИ, Р9-12621, Дубна, 1979.
6. Коломенский А.А. Теория циклических ускорителей. Физматгиз, М., 1962.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 июня 1979 года.